



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Patentschrift  
10 DE 199 04 030 C 1

21 Aktenzeichen: 199 04 030.3-24  
22 Anmeldetag: 2. 2. 1999  
43 Offenlegungstag: -  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 5. 10. 2000

51 Int. Cl. 7:  
F 16 S 1/02  
F 16 S 1/10  
F 16 S 1/14  
C 22 C 1/08  
B 22 F 3/11  
B 29 C 63/02  
F 16 F 7/12  
// B60R 21/00, 19/00,  
B62D 25/00, 21/15

DE 199 04 030 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

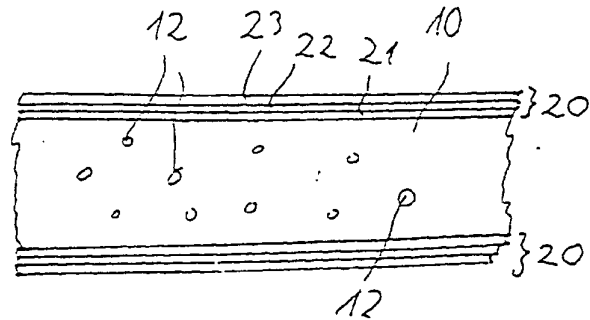
73 Patentinhaber:  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt eV,  
53175 Bonn, DE; Fraunhofer-Gesellschaft zur  
Förderung der angewandten Forschung e.V., 80636  
München, DE

72 Erfinder:  
Baumeister, Joachim, Dipl.-Phys., 28777 Bremen,  
DE; Pannkoke, Kord, Dr.-Ing., 28203 Bremen, DE;  
Herrmann, Axel, Dr., 31228 Peine, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:  
NICHTS ERMITTELT

54 Energieabsorbierendes unter Energieaufnahme plastisch verformbares Element

57 Die Erfindung betrifft ein energieabsorbierendes Element, welches plastisch unter Energieaufnahme verformbar ist. Das Element besitzt einen länglichen Grundkörper (10) aus einem metallischen Schaum und einen Mantel (20) aus faserverstärktem Kunststoff.



DE 199 04 030 C 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein energieabsorbierendes Element, welches plastisch unter Energieaufnahme verformbar ist.

Es besteht ein erheblicher Bedarf an energieabsorbierenden Elementen, insbesondere beim Automobilbau. Die Anforderungen an neue Generationen energiesparender Automobile sind sehr umfangreich. Derartige Fahrzeuge sollen vor allem in den Punkten Sicherheit, Komfort und Fahrverhalten dem Standard gegenwärtiger Mittelklassewagen entsprechen, müssen sich demgegenüber aber durch einen wesentlich verringerten Kraftstoff- und Ressourcenverbrauch auszeichnen. Um die gesteckten Ziele zu erreichen werden derzeit zahlreiche Maßnahmen beispielsweise zur Verbesserung des Wirkungsgrades von Antriebsaggregaten umgesetzt; den in diesen Bereichen erzielten Erfolgen entgegen gerichtet wirken jedoch gestiegene Sicherheitsanforderungen sowie Ansprüche an Komfort und Fahrleistung, die allesamt mit einer Gewichtserhöhung einhergehen.

Die meisten heute ausgeführten Konzepte im Kraftfahrzeugbau bestehen aus einer hochsteifen sogenannten Sicherheitsfahrgastzelle mit der Grundforderung nach höchstmöglicher Formstabilität um den Fahrzeuginsassen in einer Unfallsituation bestmöglichen Schutz zu gewähren. Die bei einem Aufprall auftretenden Energien werden dabei von Vorder- bzw. Hinterwagen in entsprechende Deformationen umgesetzt. Dazu dienen metallische Längs- und Querträger, die zum einen zur Strukturfestigkeit- und Form des Fahrzeugs beitragen und zum anderen hinsichtlich Energieaufnahmen und Formungsverhalten im Crashfall optimiert sind. Aufgrund der heute üblichen Fahrzeuggrößen stehen dabei zur Energiedissipation durch Verformung genügend lange Bereiche zur Verfügung, um die auftretenden Energiebeträge bei Crashsituationen aufnehmen zu können. Sowohl im Automobilbau als auch im Schienenfahrzeugbau werden als Crashelemente Hohlprofile eingesetzt, die in Längsrichtung durch Knittern die Crashenergie aufnehmen. Nachteil dieser Crashelemente ist, dass die Funktion nur bei zentrischem Stoß gegeben ist und relativ lange Wege zur Aufnahme der Crashenergie notwendig sind. Diese Nachteile verschärfen zusätzlich durch die Tendenz zu kompakten PKWs mit sehr kurzen Knautschzonen (S. Kalke, (Aluminiumschaum im Wettbewerb zu anderen energieabsorbierenden Systemen im Automobil in: Tagungsband Symposium Metallschäume ((ISBN 3-9805748-0-6)), Hrsg: J. Banhart, MTT-Verlag Bremen, 1997, S. 103). M. Seitzberger et. al. (Kollapsverhalten axial gedrückter, mit Aluminiumschaum gefüllter Profile in: Tagungsband Symposium Metallschäume ((ISBN 3-9805748-0-6)), Hrsg: J. Banhart, MTT-Verlag Bremen, 1997, S. 137) und Kindervater C. M., Georgi H. (Composite Strength and Energy Absorption as an Aspect of Structural Crash Resistance", Ch. 6 Structural Crashworthiness and Failure ((1993)), ((ed)) N. Jones and T. Wierzbicki, Elsevier, London), beschreiben den Einsatz von Aluminiumschäumen, die eine hohe Energieaufnahme zeigen in Kombination mit faserverstärkten Kunststoffen, die die hohe Stoßenergie aufnehmen können.

Es wird jedoch aufgrund der oben angestrebten Tendenzen zur Gewichtsreduktion zunehmend eine Verkürzung oder gar Integrierung der Vorder- und Hinterwagen in die Fahrgastzelle stattfinden, so daß die zur Energieaufnahme durch plastische Verformung verfügbaren Karosseriebereiche drastisch verringert werden.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein energieabsorbierendes Element vorzuschlagen, welches bei der Energieabsorption herkömmlichen Stahlbauträgern gleich kommt, dabei aber weniger Platzbedarf aufweist.

Diese Aufgabe wird gelöst durch einen länglichen Grund-

körper aus einem metallischen Schaum und einen Mantel aus faserverstärktem Kunststoff.

Als metallischer Schaum wird dabei vorzugsweise ein Leichtmetallschaum und insbesondere ein Aluminiumschaum eingesetzt. Diese Metallschäume sind isotrope Leichtbauwerkstoffe und wurden bisher für Sandwichstrukturen in der Bautechnik eingesetzt.

Faserverstärkte Kunststoffe sind ebenfalls für die Leichtbautechnik vielfach eingesetzt worden, eine Kombination beider Materialien führt zu einem sehr leichten Element.

Durch die Verwendung eines Grundkörpers aus einem metallischen Schaum, der mit einem Mantel aus faserverstärktem Kunststoff umwickelt ist, läßt sich eine Struktur bilden, die ein kontrollierbares, vorhersagbares und innerhalb einer Serie reproduzierbares Bruchverhalten gewährleistet und gleichzeitig außerordentlich kurze Deformationswege trotz hoher Energieaufnahme besitzt. Im Crashfall wird der Aluminiumschaum zusammengepreßt und nimmt die Energie auf, während gleichzeitig der den Schaum umgebende Mantel aus faserverstärktem Kunststoff ein definiertes Verhalten hinsichtlich der Vorzugsrichtung vorgibt und auch die Energieabsorption hinsichtlich einer Vorzugsrichtung optimiert, nämlich in Längsrichtung.

Es entsteht also eine Hybridstruktur, die bevorzugt eine zylindrische Form aufweist. Die Beanspruchungsrichtung liegt dabei parallel zur Längsachse.

Die Kombination von Grundkörper aus metallischem Schaum und Mantel aus faserverstärktem Kunststoff führt zu einer verdeutlichten Verbesserung des längenspezifischen Absorptionsverhaltens, die aus einem völlig veränderten Crashverhalten resultiert. Zum einen bewirkt der metallische Schaum des Grundkörpers eine Abstützung des Mantels aus faserverstärktem Kunststoff. Zum anderen unterdrückt der Mantel die Querkontraktion des metallischen Schaumes des Grundkörpers. Das bedeutet, daß dieser nicht mehr in alle drei Raumrichtungen kollabieren – also auseinanderbrechen – kann, wie dies bei einem isotropen Material sonst zu erwarten ist, sondern er verformt sich nun uniaxial und plastisch. Erst durch die Kombination mit dem Mantel aus faserverstärktem Kunststoff wird der metallische Schaum des Grundkörpers in die Lage versetzt, Energie mittels plastischer Verformung aufzunehmen. Ohne den Mantel würde der Schaum einfach auseinanderbrechen. Der plastische Verformungsanteil wäre verschwindend klein.

Die Kombination hat nun eine wesentlich bessere Ausnutzung des Energieaufnahmevermögens zur Folge, denn der multidirektionale Druckspannungszustand führt zu einem vollständigen Zusammendrücken der Poren bzw. zu einer plastischen Verformung des metallischen Schaumes. Der Synergieeffekt zeigt sich in der Tatsache, daß die Summe der Lastniveaus der Einzelkomponenten Mantel und Grundkörper kleiner ist als der Betrag des Lastniveaus der Hybridstruktur des erfindungsgemäßen energieabsorbierenden Elementes.

In durchgeführten Versuchen hat sich bereits gezeigt, daß dieser Synergieeffekt zu erheblich verbesserten Energieabsorptionseigenschaften einer derartigen Hybridstruktur führt, wobei diese Versuche anhand einer Struktur aus glasfaserverstärktem Kunststoff für den Mantel und Aluminium für den metallischen Schaum durchgeführt wurden.

So hat sich das Niveau der Crashmittelkraft im Vergleich zu den Einzelkomponenten mehr als verdoppelt und die maximale Stauchung dementsprechend nahezu halbiert. Die Kraft-Weg-Kurve des energieabsorbierenden Elementes in diesen Versuchen ist gut vorhersagbar. Durch Variation der Schaumdichte des Grundkörpers läßt sich gezielt das Niveau der Crashmittelkraft und die Deformation für einen spezifischen Energieeintrag verändern. Eine Beeinflussung

der Eigenschaften ist auch möglich durch Variation der Um-mantelung, etwa durch Veränderungen am Lagenaufbau, an der Dicke oder bei der Werkstoffauswahl.

Der Einfluß des Mantelmaterials hat einen entscheidenden Einfluß auf den Synergieeffekt. Umgekehrt wird das materialtypische Bruchverhalten von faserverstärkten Mänteln durch den Grundkörper nicht verändert. Die Steigerung der längenspezifischen Absorptionsenergie gegenüber einem reinen Mantel aus glasfaserverstärktem Kunststoff liegt bei fast 200%, denen lediglich eine geringfügige Abnahme der massenspezifischen Absorptionsenergie um 14,3% gegenüberstand.

Besonders bevorzugt ist es, wenn der Mantel aus faserverstärktem Kunststoff mehrere Wicklungsebenen aufweist.

Dabei ist es ganz besonders bevorzugt, wenn die innerste Wicklungsebene eine Ringwicklung ist, eine außen die innerste Wicklung umgebende zweite Wicklung eine  $\pm 45^\circ$ -Wicklung ist und wenn die zweite Wicklungsebene von einer dritten äußeren Wicklungsebene in Form einer Ringwicklung umgeben ist.

Mit einem derartigen Lagenaufbau des Mantels aus dem faserverstärkten Kunststoff, bevorzugt ist glasfaserverstärkter Kunststoff, lassen sich besonders gut die radial nach außen wirkenden Umfangskräfte aufnehmen, die durch den kollabierenden Metallschaum im Crashfalle ausgeübt werden. Diese Kräfte werden an sich am besten von einer Umfangswicklung von idealerweise  $90^\circ$  aufgenommen. Um die Umfangswicklung für den Fall der überlagerten axialen Stauchung zu stabilisieren, ist die Kombination der  $90^\circ$ -Lagen mit einer  $+45^\circ$ - oder  $-45^\circ$ -Wicklung sinnvoll, welche die mit der axialen Stauchung verbundenen Scherkräfte aufnimmt. Vorgenommene Untersuchungen haben bereits gezeigt, daß hierfür eine Wandstärke von 1,8 mm bei drei Lagen ausreichend ist.

Zusätzlich ist es bevorzugt, wenn durch den Mantel aus faserverstärktem Kunststoff zusätzlich auch ein Beitrag zum Energieverzehr geleistet werden kann. Hierfür hat es sich als vorteilhaft erwiesen, die Faserorientierungswinkel um  $5^\circ$  für die Umfangswicklung und um  $15^\circ$  für die Zwischenwicklung zu reduzieren sowie eine zusätzliche Zwischenwicklung einzufügen. Eine solche Struktur zeichnet sich dann dadurch aus, daß die innerste Wicklungsebene eine  $85^\circ$ -Wicklung, die zweite Wicklungsebene eine  $+30^\circ$ -Wicklung, die dritte Wicklungsebene eine  $-30^\circ$ -Wicklung und die vierte Wicklungsebene eine  $85^\circ$ -Wicklung ist.

Mit dieser Struktur des Mantels bei einer Wandstärke von 2,2 mm in Kombination mit einem Aluminiumschaum von einer Dichte von  $0,7 \text{ g/cm}^3$  konnten sehr gute Werte im Crashverhalten festgestellt werden, so beispielsweise eine hohe Peak-Kraft im Anfangsbereich der Kraftwegkurve und eine höhere Crashmittelkraft. Es stellte sich heraus, daß der Mantel nicht kollabiert, sondern rasierpinselartig auffasert. Dies zeigt, daß der faserverstärkte Kunststoff selbst einen Beitrag zur Energieabsorption leistet.

Von Vorteil ist es außerdem, daß die Form des Grundkörpers samt Mantel auf eine ideale Zylinderform nicht notwendig festgelegt ist. Es kann durchaus eine andere Form gewählt werden, wenn dies aus karrosseriespezifischen Randbedingungen her gewünscht wird.

Die Herstellung der erfindungsgemäßen Elemente ist in großer Stückzahl besonders kostengünstig möglich, wenn zunächst ein Grundkörper aus dem metallischen Schaum fertig in gewünschter Form hergestellt und daran anschließend um diesen Kern eine Matrix mit darin eingelegten Fasern um den Grundkörper herumgewickelt wird.

Es ist möglich, den metallischen Schaum mit zusätzlichen Legierungsbestandteilen zu versehen, um eine Optimierung seiner Eigenschaften zu erzielen. Zu nennen ist hier eine

verbesserte Härtebarkeit oder Festigkeitserhöhung des metallischen Schaumes.

Versuche mit Schaumdichten von  $0,4$ ,  $0,7$  und  $1 \text{ g/cm}^3$  zeigten positive Ergebnisse. Durch die erfindungsgemäße Hybridstruktur sind jedoch sogar Schäume mit sehr niedrigen Dichten bis herab zu  $0,3 \text{ g/cm}^3$  einsetzbar.

Die Porenstruktur wird daher bevorzugt auf eine Schaumdichte um etwa  $0,3 \text{ g/cm}^3$  eingestellt, was eine besonders leichte Bauweise unterstützt, die Stabilität des Schaumes aufgrund des Mantels auch unter Crashbelastung beibehält und zu guten Deformationseigenschaften des energieabsorbierenden Elementes führt.

Andere Schaumdichten sind ebenfalls möglich und können mit anderen Ausbildungen der Lagen und Wicklung des Fasermaterials kombiniert werden. Dadurch können je nach Wunsch bedarfsorientierte Kraft-Weg-Verläufe der energieabsorbierenden Elemente festgelegt werden und auch geometrisch sehr komplexe Bauteile können hergestellt werden.

Der Einsatz der erfindungsgemäßen energieabsorbierenden Elemente bietet sich nicht nur beim Bau von Kraftfahrzeugzellen an, sondern überall dort, wo hohe massenspezifische Energien bei gleichzeitig geringen Deformationswegen mit guter Kraft-Weg-kennung absorbiert werden sollen. Man unterliegt dabei keinen großen konstruktiven und geometrischen Einschränkungen.

Die Erfindung wird anhand des nachstehenden Ausführungsbeispiels näher erläutert. Darin zeigt:

Fig. 1 im Schnitt eine schematische Darstellung des Aufbaus eines energieabsorbierenden Elements.

Ein energieabsorbierendes Element ist von länglichem zylinderförmigem Aufbau. Der Durchmesser beträgt zwischen  $0,5$  und  $20 \text{ cm}$ , die Länge ist deutlich größer als der Durchmesser und liegt zwischen einigen Zentimetern und in Spezialfällen einigen Metern.

Das Element besitzt einen länglichen, zylindrischen Grundkörper **10**, welcher aus einem metallischen Schaum, insbesondere Aluminiumschaum besteht. Zu erkennen sind einige lediglich schematisch angedeutete Poren **12**. Diese Poren werden im Crashfall zusammengedrückt und führen zu der gewünschten Deformation.

Der längliche zylindrische Grundkörper **10** aus dem metallischen Schaum ist umgeben von einem Mantel **20**. Der Mantel **20** besteht aus faserverstärktem Kunststoff, beispielsweise glasfaserverstärktem Kunststoff. In der Darstellung sind drei Wicklungsebenen **21**, **22** und **23** vorgesehen. Dabei ist bevorzugt die innerste Wicklung **21** als Ringwicklung ausgebildet, die sich darum nach außen anschließende zweite Wicklung **22** als  $\pm 45^\circ$ -Wicklung und die dritte äußerste Wicklung **23** wiederum als Ringwicklung.

#### Patentansprüche

1. Energieabsorbierendes Element, welches plastisch unter Energieaufnahme verformbar ist, dadurch gekennzeichnet, daß das Element einen länglichen Grundkörper (**10**) aus einem metallischen Schaum und einen Mantel (**20**) aus faserverstärktem Kunststoff besitzt.
2. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Grundkörper (**10**) aus einem Leichtmetallschaum besteht.
3. Element nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Grundkörper (**10**) aus einem Aluminiumschaum besteht.
4. Element nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Grundkörper (**10**) zylinderförmig und der faserverstärkte Kunststoff den zylinderförmigen Körper exakt umgebend ausgebildet ist.

5. Element nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der faserverstärkte Kunststoff ein glaserfaserverstärkter Kunststoff (GFK) ist.

6. Element nach einem der vorstehenden Ansprüche, 5  
dadurch gekennzeichnet, daß der Mantel (20) aus faserverstärktem Kunststoff mehrere Wicklungsebenen (21, 22, 23) aufweist.

7. Element nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, 10  
daß mindestens eine der Wicklungsebenen eine Umfangswicklung von  $90^\circ \pm 10^\circ$  ist.

8. Element nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, 15  
daß die innerste Wicklungsebene eine Ringwicklung ist, eine außen die innerste Wicklung (21) umgebende zweite Wicklung (22) eine  $\pm 45^\circ$ -Wicklung ist und daß die zweite Wicklungsebene von einer dritten äußeren Wicklungsebene (23) in Form eine Ringwicklung umgeben ist.

9. Element nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, 20  
daß die innerste Wicklungsebene eine  $85^\circ$ -Wicklung, die zweite Wicklungsebene eine  $+30^\circ$ -Wicklung, die dritte Wicklungsebene eine  $-30^\circ$ -Wicklung und die vierte Wicklungsebene eine  $85^\circ$ -Wicklung ist.

10. Verfahren zur Herstellung energieabsorbierender 25  
Elemente nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zunächst ein Grundkörper (10) aus dem metallischen Schaum fertig in gewünschter Form hergestellt und daran anschließend um diesen Kern eine Matrix mit darin eingelegten Fasern um den Grundkörper (10) herumgewickelt wird. 30

---

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

---

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

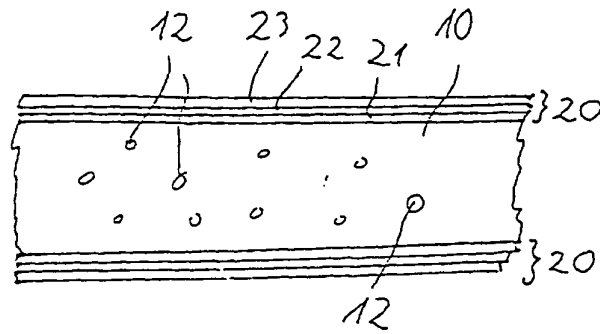


FIG. 1.